

关于一般建筑物抗震设防标准问题

常宝琦

(广东省地震局)

提要 工程场地的设计地震动参数,目前多用概率地震危险性分析的方法给出,场地的地震基本烈度以设计基准期 $T=50$ 年、加速度超越概率 $P=0.1$ 的标准确定。本文根据广东省数地地震危险性分析结果结合我国常见的砖混结构的地震动参数的优化决策,认为上述标准宜取为 $T=50$ 年、 $P=0.05-0.1$ 。

关键词: 抗震设防标准 地震动参数 优化决策 超越概率取值

引 导

根据我国新的工业民用建筑抗震设计规范^[1],一般工业民用建筑的抗震设防仍以地震基本烈度为准。同时,规范规定采用两级抗震设计,第一级设计以大致为基本烈度减1.5度的“众值烈度”进行截面设计,第二级设计以基本烈度加1度的“罕遇烈度”进行变形校核,以期实现“小震不坏,大震不倒”的抗震设计原则。在规范的说明书中规定,在进行过地震危险性分析的地方,以设计基准期 $T=50$ 年, $P=0.632$ 、 $P=0.1$ 和 $P=0.02-0.03$ 的地震动参数作为“众值烈度”、“基本烈度”和“罕遇烈度”的取值。

很明显,在勿须或尚未进行地震危险性分析的地方,就需要以地震基本烈度为基础按前述原则决定两级抗震设计的地震动参数。因此,在这种情况下,地震基本烈度的取值问题就变得很重要了。在制订新规范时,曾把用概率地震危险性分析的结果与传统的定数法的烈度进行了大量比较^[2],这就是用概率地震危险性分析确定地震基本烈度以 $T=50$ 年、 $P=0.1$ 为准的主要依据。虽然也有少量的两者相差 ± 1 度甚至更高些的结果,但两者大体相合。为慎重确定基本烈度用概率法的取值标准,我们觉得用以地震危害性分析为基础的最优决策方法来探讨此标准也是有意义的。

一、地震危害性分析

在工程地震学中新的研究领域正在拓展,以结构易损性和地震危险性相结合的结构地震危害性为基础的地震动优化决策方法的研究正在兴起。所谓地震危害性可表为^[3]

$$P[S_i] = \sum_j P[S_i/A_j] P[A_j] \quad (1)$$

式中, $P[S_i]$ 即为结构地震危害性,它表示地震时结构蒙受某种破坏状态 S_i 的概率($i=1, 2, \dots, n$),破坏状态有人分5、6或7级。我国多取5级,例如 S_1 表示地震时结构保持完好, S_2 表示震害轻微, S_3 表示中等破坏, S_4 表示严重震害,而 S_5 表示倒塌。参照美国ATC

规范^[4]，各级震害造成的建筑物损失（以建筑物原造价的百分数表示，称为中心震害比）分别为 $d_1=0$ ， $d_2=5\%$ ， $d_3=20\%$ ， $d_4=65\%$ ， $d_5=100\%$ 。式（1）右端第一项 $P[S_i/A_j]$ 表示结构的易损性，即在出现地震动 A_j 时建筑物产生破坏状态 S_i 的概率。右端第二项 $P[A_j]$ 为场地发生地震动 A_j 的概率，即所谓地震危险性。

如果地震动参数用离散的烈度表示时，结构遭受破坏状态 S_i 的年发生率 v_{S_i}

$$v_{S_i} = \sum_I P[S_i/I] P[I] = \sum_I P[S_i/I] (v_I - v_{I+1}) \quad (2)$$

因此产生大于 S_i 的概率为

$$P[\geq S_i] = 1 - e^{-v_{S_i} T} \quad (3)$$

式（2）、（3）中， v_I 、 v_{I+1} 和 $v_{S_i} \geq i$ 分别为烈度 I 、 $I+1$ 和破坏状态大于 i 的年发生率， T 为设计基准期。

二、结构易损性

结构易损性的含义已如前述，很明显它既与地震动水平有关，也与结构类型和抗震性能有关。目前多以震害调查、模型实验等方法以震害概率矩阵的形式给出。表1为高层抗弯钢框架、木框架以及中层混凝土剪力墙建筑的震害概率矩阵。表2为我国常见的多层砖结构的震害概率矩阵^[5、6、7]。

表1 几种类型建筑物的震害概率矩阵

Table. 1 damage probability matrices for several types of building

高层抗弯钢框架建筑							
破坏状态 (中心震害比)	烈 度						
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
完好(0)	26.8	0.5	—	—	—	—	—
极轻微损坏(0.05)	60.0	22.2	2.7	—	—	—	—
轻微损坏(5)	13.2	77.1	92.3	58.8	14.7	5.9	0.8
中等破坏(20)	—	0.2	5.0	41.2	83.0	67.1	42.3
严重破坏(35)	—	—	—	—	2.3	20.9	55.7
完全破坏(80)	—	—	—	—	—	0.1	1.2
例 塌(100)	—	—	—	—	—	—	—

低层木框架房屋							
完好(0)	3.7	—	—	—	—	—	—
极轻微损坏(0.05)	68.5	26.8	1.6	—	—	—	—
轻微损坏(5)	27.8	73.2	94.9	62.4	11.5	1.8	—
中等破坏(20)	—	—	3.5	37.6	76.0	75.1	24.8
严重破坏(45)	—	—	—	—	12.5	23.1	73.5
完全破坏(80)	—	—	—	—	—	—	1.7
例 塌(100)	—	—	—	—	—	—	—

完好 (0)	2.4	—	—	—	—	—	—
极轻微损坏 (0.05)	59.0	8.6	—	—	—	—	—
轻微损坏 (5)	38.6	89.1	66.4	11.7	0.4	—	—
中等破坏 (20)	—	2.2	33.6	83.9	19.7	3.7	—
严重破坏 (45)	—	—	—	4.4	42.7	77.0	77.6
完全破坏 (80)	—	—	—	—	—	3.2	18.7
倒塌 (100)	—	—	—	—	—	—	—

表 2 多层砖房震害概率矩阵

Table. 2 damage Probability matrices for multistory brick building

1969年阳江地震 (6.4级)						
破坏状态 (中心震害比)	烈 度					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
完好 (0)	45.0	16.3	—	—	—	—
轻微损坏 (5)	15.0	36.7	18.2	—	—	—
中等破坏 (20)	20.0	20.4	27.3	—	—	—
严重破坏 (65)	20.0	20.4	27.3	—	—	—
倒塌 (100)	—	6.1	27.3	—	—	—

1975年辽南地震 (7.3级)						
完好 (0)	45	24.5	29.0	6.7	—	—
轻微损坏 (5)	45	16.0	21.0	12.5	—	—
中等破坏 (20)	10	13.8	29.0	16.4	—	—
严重破坏 (65)	—	44.7	21.0	56.7	—	—
倒塌 (100)	—	—	—	7.7	—	—

1976年唐山地震 (7.8级)						
完好 (0)	46.2	43.5	11.8	1.3	0.6	0.3
轻微损坏 (5)	40.2	21.7	35.3	6.6	5.0	1.5
中等破坏 (20)	12.2	21.7	29.4	34.4	0.5	4.7
严重破坏 (65)	1.4	13.0	23.5	32.5	19.9	11.7
倒塌 (100)	—	—	—	25.2	68.0	81.8

三、地震危害性分析例

这里作为例子, 根据深圳市地震危险性分析的结果¹⁾和表 2 所列多层砖房震害概率矩阵, 对深圳市的多层砖房的地震危害性作一分析, 结果见表 3, 其中烈度 I 的年发生率 ν , 根据 [8] 的结果

1) 广东省地震局, 国家地震局地质研究所, 深圳市地震危险性分析和地震烈度评定, 1989

表3

深圳多层砖房各种破坏状态概率预测

Table. 3 Probabilities of various damage states of multistory brick building in Shenzhen

	V ₁	V ₁₁	V ₂₁	V _s ≥1	P (S _i)
V ₁	0.0051	0.0005	—	—	—
V ₁ —V ₁ +1	0.0046	0.0005	—	—	—
V _{S₁}	2.07×10 ⁻³	8.2×10 ⁻⁵	2.152×10 ⁻³	5.1×10 ⁻³	0.225
	2.07×10 ⁻³	1.23×10 ⁻⁴	2.193×10 ⁻³	5.096×10 ⁻³	0.225
	2.13×10 ⁻³	2.18×10 ⁻⁴	2.348×10 ⁻³	5.107×10 ⁻³	0.225
V _{S₂}	6.9×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴	8.74×10 ⁻⁴	2.949×10 ⁻³	0.137
	2.07×10 ⁻³	8.0×10 ⁻⁵	2.15×10 ⁻³	2.903×10 ⁻³	0.139
	1.85×10 ⁻³	1.09×10 ⁻⁴	1.96×10 ⁻³	2.759×10 ⁻³	0.129
V _{S₃}	9.2×10 ⁻⁴	1.02×10 ⁻⁴	1.022×10 ⁻³	2.075×10 ⁻³	0.099
	4.6×10 ⁻⁴	6.9×10 ⁻⁵	5.29×10 ⁻⁴	7.53×10 ⁻⁴	0.037
	5.61×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻⁴	6.7×10 ⁻⁴	8.0×10 ⁻⁴	0.039
V _{S₄}	9.2×10 ⁻⁴	1.02×10 ⁻⁴	1.022×10 ⁻³	1.053×10 ⁻³	0.051
	—	2.24×10 ⁻⁴	2.24×10 ⁻⁴	2.24×10 ⁻⁴	0.011
	6.4×10 ⁻⁵	6.6×10 ⁻⁵	1.30×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻⁴	0.006
V _{S₅}	—	3.1×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻⁵	0.002
	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—

注：表3中每栏的三个数字，自上而下分别根据阳江、辽南和唐山地震的多层砖房的震害概率矩阵。

从表3可知，如采用 $P[S_i] = 0.1$ 为标准，则深圳市的多层砖房可能遭受6度和7度（以6度为主）的轻微损坏到中等破坏（根据阳江地震的震害概率矩阵可能产生中等破坏，而根据辽南和唐山地震可能遭受轻微损坏）。震害所造成的经济损失，即中心震害比参考ATC的数据取为20%。

四、设计地震动的优化决策

所谓设计地震动的优化决策就是选择的设计地震动使目标函数（初期造价+震害损失）为最小^[8]。由于规范中设计地震动参数仍以地面加速度表示，因此决策变量也取为地面最大加速度 X 。

假设建筑物不考虑抗震的初期投资为 C_0 ，设防加速度为 a ，而考虑抗震设防的初期投资增加量与加速度 a^2 成正比，比例系数 R 与结构类型有关，对于砖混结构 R 大致等于1.7。因此考虑抗震的初期投资 C_1

$$C_1 = (1 + Ra^2) C_0 \quad (4)$$

震害造成的总损失 C_2 （包括建筑物破坏的损失及建筑物内设备、人员伤亡的损失）也是

设防标准 a 的函数，并表为

$$C_2 = \begin{cases} B(X-a)C_0 & \text{当 } X > a \\ 0 & \text{当 } X \leq a \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中系数 B 与结构用途和抗震性能有关，例如，根据表3深圳市多层砖房的危害性分析，以6度为主的中等震害时的中心震害比为20%，假如还有部分设备和人员损失，总损失取为 $0.25C_0$ ，则

$$B(X-a)C_0 = B(0.05-0)C_0 = 0.25C_0 \quad (6)$$

因此 $B=5$ 。

很明显， X 是随机量，其期望值

$$E(C_2) = BC_0 \int_a^{\infty} (X-a) f_X dx \quad (7)$$

式中， f_X 是地面加速度的概率密度函数。

当加速度超越概率 $P(X \geq a)$ 表为

$$P(X \geq a) = \alpha e^{-\beta x^2} \quad (8)$$

则其分布函数 $F(X \leq a)$

$$F(X \leq x) = 1 - P(X \geq x) = 1 - \alpha e^{-\beta x^2} \quad (9)$$

因此其概率密度函数 $f(x)$

$$f(x) = \frac{d}{dx} (1 - \alpha e^{-\beta x^2}) = 2\alpha\beta e^{-\beta x^2} \quad (10)$$

为使目标函数为最小，则

$$\frac{d}{dx} [E(C)] = \frac{d}{dx} (1 + Ra^2 + 2B\alpha\beta \int_a^{\infty} X(X-a) e^{-\beta x^2} dx) = 0 \quad (11)$$

因此优化决策方程为

$$B\alpha\beta e^{-\beta a^2} - 2Ra = 0 \quad (12)$$

五、地震基本烈度的概率取值问题

表4列出广东省几个场地的地面最大加速度超越概率分布。按式(8)计算的各场地的 α 、 β 参数，并如前述取 $R=1.7$ 、 $B=5$ 时，则可按式(12)计算出最大加速度优化决策值。

从表4可知，对于常见的多层砖房来说，如以优化决策的地面最大加速度规定为设防标准，其与加速度超越概率所对应的取值标准以 $T=50$ 年， $P=0.1-0.05$ 为宜。

表 4 广东省数地地震危险性分析结果与最优决策地面加速度比较

Table. 4 Comparisons between ground accretation from hazard analysis
and hat of optimum decision in several sites of Guangdong

加 速 度 超 越 概 率		0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.07	0.05	0.02	0.01	α, β	优化决策 _a
场 地	T=50年	0.032	0.046	0.062	0.082	0.097	0.123	0.136	0.149	0.185	0.213	0.646, 101.34	0.138
		100年	0.047	0.065	0.083	0.104	0.121	0.148	0.162	0.175	0.213	0.242	0.774, 80.72
汕头广德(2)	50年	0.082	0.081	0.101	0.130	0.153	0.192	0.214	0.235	0.297	0.346	0.629, 38.62	0.199
	100年	0.082	0.107	0.131	0.164	0.190	0.234	0.258	0.280	0.346	0.398	0.722, 29.82	0.228
广宁花山 电站(3)	50年	0.022	0.028	0.034	0.045	0.053	0.065	0.071	0.077	0.097	0.120	0.595, 329.78	0.084
	100年	0.029	0.036	0.045	0.056	0.063	0.077	0.082	0.091	0.114	0.135	0.686, 262.92	0.095
海丰黄江 大桥(4)	50年	0.067	0.075	0.082	0.087	0.100	0.114	0.123	0.131	0.152	0.173	1.417, 180.29	0.125
	100年	0.075	0.084	0.093	0.098	0.113	0.129	0.137	0.145	0.169	0.195	1.416, 143.50	0.138
湛江电厂(5)	50年	0.012	0.018	0.030	0.053	0.063	0.092	0.110	0.130	0.175	0.235	0.362, 78.27	0.133
	100年	0.019	0.034	0.049	0.071	0.086	0.122	0.140	0.162	0.225	0.290	0.387, 51.66	0.158

- (1) 广东省地震科技咨询服务中心, 珠海市香洲、吉大, 拱北三区地震小区划综合报告, 1987;
 (2) 广东省地震局广澳地震小区划工作队, 广澳开发区地震危险性分析与地震影响小区划综合研究报告, 1986;
 (3) 广东省地震科技咨询服务中心, 广宁花山电站地震危险性分析研究报告, 1989;
 (4) 广东省地震科技咨询服务中心, 深珠汕公路黄江大桥地震基本烈度评定, 1989;
 (5) 广东省地震科技咨询服务中心, 湛江市电厂地震基本烈度评定报告, 1986;

参 考 文 献

- [1] 建筑抗震设计规范GBJ11—89, 1989.
- [2] 冯小旺、鲍谔武, 抗震设防标准及各类建筑物抗震设计中“小震”与“大震”的取值, 地震工程与工程振动, 9卷1期, 1989.
- [3] 胡韦贤, 地震工程学, 地震出版社, 1988.
- [4] Charles Scawthorn (ed), Techniques for rapid assessment of seismic vulnerability, ASCE, 1986.
- [5] 民用建筑抗震组, 阳江地震中多层砖房的震害及地震荷载系数的反算, 地震工程研究报告集, 3集, 科学出版社, 1977.
- [6] 中国科学院工程力学研究所编, 海城地震震害, 地震出版社, 1979.
- [7] 刘恢先主编, 唐山大地震震害, 第二册, 地震出版社, 1986.
- [8] 董伟民、周锡元、鲍谔武, 决策分析方法在抗震工程中的应用, 重要工程中的地震问题, 地震出版社, 1987.

A ISSUE ABOUT THE SEISMIC PROTECTION CRITERION OF ORDINARY INDUSTRY AND CIVIL BUILDING

Chang Baoqi

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

[Abstract] Recently, the parameter of design seismic ground motion is often given by the probabilistic seismic hazard analysis method, and the exceedance probability 0.1 during a 50 year period is taken as the criterion of basic seismic intensity. Based on the results of hazard analysis in several sites of Guangdong and combined with the optimum decision of maximum ground acceleration for common brick building in China, to take the exceedance probability 0.05-0.1 during a 50 year period as the criterion may be suitable in the paper.

Key words: Seismic protection criterion, Parameter of seismic ground motion, Optimum decision, Value of intensity probability